Matériaux et Composants Électroniques

Résumé complet — Séances 1 à 5

Pr. Smail AMRAOUI · Université Ibn Tofaïl

Chapitre 1 — Introduction aux SC & Théorie des bandes d'énergie

■ Définitions clés

Semi-conducteur : Matériau dont la conductivité électrique est intermédiaire entre un conducteur et un isolant. Sa conductivité peut être contrôlée par *dopage, température, lumière* ou *tension*.

Bande de valence (BV) : Bande d'énergie la plus haute occupée par les électrons à T = 0 K. Les électrons y sont liés aux atomes.

Bande de conduction (BC) : Bande d'énergie au-dessus de la BV. Les électrons qui l'occupent circulent librement dans le solide.

Bande interdite (Gap) : Zone d'énergie interdite séparant la BV de la BC. Son énergie caractéristique est $E_g = E_C - E_V$.

Niveau de Fermi (E_F) : Niveau d'énergie dont la probabilité d'occupation est exactement ½ à tout T.

■ Classification des matériaux selon E_g

Conducteurs	$E_g = 0$ eV — chevauchement BV/BC (ex : Cu, Al)
Semi-conducteurs	$0 < E_g < 5$ eV (Si : 1,12 eV ; Ge : 0,67 eV ; GaAs : 1,40 eV)
Isolants	$E_g > 5{,}5$ eV — les électrons ne peuvent franchir le gap (Diamant ≈ 6 eV)

■ Relations fondamentales

Distribution de Fermi-Dirac — probabilité d'occupation d'un niveau E :

$$f_n(E) = 1 / [\, 1 + \exp((E - E_F) / kT) \,]$$

Influence de la température sur E_g (loi de Varshni) :

$$E_G(T) = E_G(0) - \alpha\, T^2 / (T + \beta)$$

Types de semi-conducteurs :

- SC **simples** : colonne IV du tableau périodique (Si, Ge, C)
- SC **composés binaires III-V** : GaAs, GaN, InP, GaP …
- SC **composés binaires II-VI** : CdTe, ZnS, ZnSe …
- SC **ternaires** : $Al_xGa_{(1-x)}As$

Chapitre 2 — Semi-conducteurs dopés (extrinsèques)

■ Définitions — SC intrinsèque vs extrinsèque

SC intrinsèque : SC pur sans impuretés. À T = 0 K, la BC est vide et la BV est pleine. Le niveau de Fermi est au milieu du gap.

SC extrinsèque (dopé) : SC dans lequel on a introduit volontairement des impuretés (dopants) pour modifier le nombre de porteurs libres.

Dopage N (type n) : Impuretés donneuses de la colonne V (P, As, Sb). L'atome possède 5 électrons de valence → libère un électron en surplus. Les **électrons sont porteurs majoritaires**.

Dopage P (type p) : Impuretés acceptrices de la colonne III (B, Al, Ga). L'atome possède 3 électrons de valence → crée un trou. Les **trous sont porteurs majoritaires**.

■ Relations — SC intrinsèque

$n = N_C \exp(-(E_C - E_{Fi})/kT)$	Densité d'électrons dans la BC
$p = N_V \exp(-(E_{Fi} - E_V)/kT)$	Densité de trous dans la BV
$n \cdot p = n_i^2 = N_C N_V \exp(-E_g/kT)$	Loi d'action de masse
$E_F \approx (E_C + E_V)/2 = E_V + E_g/2$	Niveau de Fermi intrinsèque (milieu du gap)

■ Relations — SC dopé N et P

$n \approx N_D$	Concentration d'électrons ≈ concentration en donneurs (dopage N, T ambiante)
$p = n_i^2 / N_D$	Concentration de trous (porteurs minoritaires, type N)
$p \approx N_A$	Concentration de trous ≈ concentration en accepteurs (dopage P, T ambiante)
$n = n_i^2 / N_A$	Concentration d'électrons (porteurs minoritaires, type P)
$E_F = E_i + kT \ln(N_D/n_i)$	Niveau de Fermi — SC type N (se rapproche de E_C)
$E_F = E_i - kT \ln(N_A/n_i)$	Niveau de Fermi — SC type P (se rapproche de E_V)
$p + N_D = n + N_A$	Équation de neutralité électrique

■ Conductivité électrique

$\sigma = e(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$	Conductivité totale du semi-conducteur
$j = e(p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)E$	Densité de courant de conduction
$\mu_n = e \cdot \tau_n / m_n$	Mobilité des électrons (τ_n = temps de relaxation, m_n = masse apparente)
$\mu_p = e \cdot \tau_p / m_p$	Mobilité des trous
$\rho = [q(n\mu_n + p\mu_p)]^{-1}$	Résistivité — diminue quand T augmente (pour un SC intrinsèque)

Chapitre 3 — Semi-conducteur hors équilibre

■ Définitions — Génération & Recombinaison

État hors équilibre : État où les concentrations de porteurs sont modifiées par une perturbation extérieure (champ intense, lumière, particule énergétique).

Génération thermique : À $T \neq 0$ K, l'agitation thermique permet à des électrons de passer de la BV à la BC, créant des paires électron-trou.

Génération lumineuse (photovoltaïque) : Un photon d'énergie $h\nu \geq E_g$ est absorbé et crée une paire électron-trou.

Génération par avalanche : Champ électrique intense → porteurs chauds → ionisation → multiplication de porteurs.

Génération extrinsèque : Les impuretés créent des niveaux d'énergie dans le gap (niveaux pièges).

Recombinaison directe (radiative) : Transition BC → BV avec émission d'un photon (principe des LED).

Recombinaison Auger : L'énergie de recombinaison est transférée à un troisième porteur (non radiative).

Recombinaison indirecte : Via des niveaux profonds (pièges) introduits par des défauts ou impuretés.

■ Relations — Génération, Recombinaison & Durée de vie

$\lambda \leq 1{,}24 / E_g$ (eV) [µm]	Condition d'absorption d'un photon
$G' = G_{th} + G$ [$cm^{-3} \cdot s^{-1}$]	Taux de génération total (thermique + externe)
$(dn/dt)_{G,R} = G' - R' = G + G_{th} - R'$	Bilan génération-recombinaison
$U = R' - G_{th}$	Taux net de recombinaison (U = 0 à l'état stationnaire)
$(dn/dt)_{GR} = G - U$ [$cm^{-3} \cdot s^{-1}$]	Équation de continuité des porteurs
τ_n, τ_p [s]	Durée de vie des porteurs minoritaires (10^{-9} à 10^{-3} s)

Chapitre 4 — Jonction p-n

■ Définitions — Formation de la jonction

Jonction p-n : Interface entre une région dopée P et une région dopée N dans un même semi-conducteur.

Zone de charge d'espace (ZCE) / Zone de déplétion : Région au voisinage de la jonction vidée de porteurs mobiles, contenant uniquement les ions fixes (accepteurs ionisés – côté P, donneurs ionisés + côté N).

Barrière de potentiel (V_d) : Différence de potentiel interne qui s'établit à l'équilibre et s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires.

Champ électrique interne E_0 : Champ créé par la ZCE, orienté de N vers P, qui équilibre la diffusion.

Phénomène transitoire : Diffusion des trous (P→N) et des électrons (N→P) lors de la mise en contact.

Phénomène permanent : Formation de la ZCE avec ions fixes de bore (–) côté P et ions de phosphore (+) côté N.

■ Relations — Jonction à l'équilibre (V = 0)

$V_d = (kT/q)\, ln(N_A \cdot N_D / n_i^2)$	Potentiel de contact (tension de diffusion)
$V_d(Si, 300K) \approx 0{,}6–0{,}7\ V$	Valeur typique pour le silicium
$N_A \cdot x_p = N_D \cdot x_n$	Neutralité globale de la ZCE
$W = x_p + x_n = \sqrt{(2\varepsilon/q \cdot (N_A+N_D)/(N_A \cdot N_D) \cdot V_d)}$	Largeur totale de la ZCE à V = 0
E_F *uniforme dans tout le cristal*	Condition d'équilibre thermodynamique

■ Relations — Jonction polarisée

$W(V) \propto \sqrt{(V_d - V)}$	Largeur de ZCE sous polarisation directe (V > 0 → W diminue)
$W(V) \propto \sqrt{(V_d + \lvert V \rvert)}$	Largeur de ZCE sous polarisation inverse (V < 0 → W augmente)
$C_j = \varepsilon \cdot S / W(V)$	Capacité de jonction (condensateur plan)
$1/C_j^2 \propto (V_d + V_R)$	Linéarité de $1/C^2$ en fonction de V_R → détermine N_D
$I = I_s(e^{qV/kT} - 1)$	Équation de Shockley (caractéristique I-V de la diode)

■ Comportement sous polarisation

Polarisation directe (V > 0, borne + sur P) :

- La barrière de potentiel diminue de V_d à (V_d – V)
- Les porteurs majoritaires diffusent → courant important
- La ZCE se rétrécit

Polarisation inverse (V < 0, borne – sur P) :

- La barrière de potentiel augmente à (V_d + |V|)
- La diffusion des porteurs majoritaires est bloquée
- Seul le courant de génération thermique I_S circule (très faible)
- La ZCE s'élargit → effet condensateur (capacité variable)

Chapitre — — Tableau récapitulatif des symboles

Symbole	Nom	Unité
E_g	Énergie du gap (bande interdite)	eV
E_C	Bas de la bande de conduction	eV
E_V	Haut de la bande de valence	eV
E_F	Niveau de Fermi	eV
k	Constante de Boltzmann ($8{,}62\times10^{-5}$ eV/K)	eV/K
T	Température absolue	K
n	Densité d'électrons libres	cm^{-3}
p	Densité de trous libres	cm^{-3}
n_i	Densité intrinsèque (Si à 300K : ~10^{10} cm^{-3})	cm^{-3}
N_D	Concentration en donneurs (dopage N)	cm^{-3}
N_A	Concentration en accepteurs (dopage P)	cm^{-3}
μ_n	Mobilité des électrons (Si : ~1350 cm^2/Vs)	cm^2/Vs
μ_p	Mobilité des trous (Si : ~480 cm^2/Vs)	cm^2/Vs
σ	Conductivité électrique	S/cm
ρ	Résistivité	$\Omega\cdot cm$
V_d	Tension de diffusion (potentiel de contact)	V
W	Largeur de la zone de charge d'espace	µm
C_j	Capacité de jonction	F
τ	Durée de vie des porteurs minoritaires	s
G'	Taux de génération de paires électron-trou	$cm^{-3}\cdot s^{-1}$
R'	Taux de recombinaison	$cm^{-3}\cdot s^{-1}$